



## Yapay bir göldeki termal değişikliklerin bir boyutlu sayısal model ile simülasyonu

### Thermal changes in an artificial lake simulated using a one-dimensional numerical model

Talia Ekin TOKYAY SİNHA<sup>1\*</sup>, Mehmet Yücel YETGİN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.  
talia.ekin.tokyay@gmail.com

<sup>2</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.  
yetginmy@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 15.01.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 12.06.2018  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.78871  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışma yüksek sıcaklıktaki suyun göl ve rezervuar gibi akıntısız su kütlelerine verilmesini incelemektedir. Sayısal çalışmada PROBE isimli bir boyutlu (1B) sonlu hacim yazılımı kullanılmıştır. Yazılım, yüksek sıcaklıktaki suyun ve rüzgârın göl içindeki karışma süreçlerine etkisine, Koriolis etkisine ve güneş ışınımı etkisine açıklamalar getirmektedir. Bu koşullar termik santrallerdeki (kömür, doğalgaz, nükleer vb.) soğutma işlemleriyle alakalıdır. Mevsimsel doğal tabakalaşma ve termoklin oluşumu sayısal yöntemlerle ışık geçirim katsayısı, güneş ışınımı ve rüzgâr hızı kalibre edilerek gerçek bir göl için elde edilmiştir. Yapay bir göle su girişinde ve gölden su çıkışında oluşan termal tabakalaşma birçok durum için çalışılmıştır. Çalışma, yapay gölde, su giriş ve çıkışın kısa dalga ışınımı ve rüzgâr etkisi ile beraber düşük termal profile yaptığı etkiyi bir günlük (24 sa.'lik) süre için incelemektedir. 24 sa.'lik sonuçlar ortalama bir işlemci ve bilgisayar kullanılarak dakikalar içinde elde edilmiştir. Bu daha uzun vadedeki sonuçların kısa sürede elde edilebileceğini göstermiş ve bu tür kodların termal mühendislik uygulamalarında ne kadar kullanışlı olduğunu ortaya koymuştur.

**Anahtar kelimeler:** PROBE, Termoklin, Termik santral soğutma sistemleri, Işık geçirim katsayısı, Güneş ışınımı

#### Abstract

This study focuses on release of high temperature water to still water bodies such as lakes and reservoirs. The numerical study is conducted using one dimensional (1D) finite volume code, PROBE. The code accounts for effect of high temperature water release, effect of wind over the lake in mixture processes, Coriolis' effect and solar radiation. These conditions are relevant in cooling operations of thermal (coal, natural gas, nuclear etc.) power plants. Natural stratification and thermocline formation in a real lake is achieved by calibration of light extinction coefficient, solar radiation and wind velocity. The inflow and outflow of water to and from an artificial lake is studied under several scenarios when a thermal stratification exists. Study investigates the effect of inflow and outflow of water to an artificial lake under the effect of short wave radiation and wind for a period of one day (24 hours). Results for 24-hour simulations were obtained within minutes using an average processor and computer. This shows how such 1D models are viable tools in thermal engineering applications when long term results are required to be assessed in short time.

**Keywords:** PROBE, Thermocline, Thermal power Plant cooling systems, Light extinction coefficient, Solar radiation

## 1 Giriş

Göller; rüzgâr, güneş ışınımı, içeri ve dışarı akış gibi çeşitli dış etmenlerin etkisi altında değişik batimetrik şekillere sahip su kütleleridir. Yağmur, nehirler ya da yeraltı suyu katkısı içeri akışa örnek olarak gösterilebilmektedir. Tahliye edilen su ve buharlaşma dışarı akış için belli başlı örneklerdir. Dünyanın her yerinde birçok doğal göl olmasına rağmen çeşitli amaçlar için suni göller de oluşturulmuştur. Bu amaçlara örnek olarak tarım, sulama, taşkın kontrolü, enerji üretimi ve soğutma sistemleri sıralanabilir. Örneğin, nükleer santraller mümkün mertebe bir göl, nehir veya deniz kıyısında kurulmaktadır. Aksi halde, gerekli boyutlarda bir suni göl inşa etme gereği duyulmaktadır. Bu süreçte en önem arz eden nokta, termik santral inşasından sonra, işletme fazına geçince, yüksek sıcaklıktaki suyun bu göle bırakılacağı ve soğuk suyun gölden santrale doğru çekileceği hususudur. Bu durum su kütesindeki dikey sıcaklık dağılımında ani değişimlere neden olacaktır. Bu suyun sıcaklığı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığının ilgili şartnamelerinde belirtilen değerlere uygun olmalıdır.

Göllerdeki dikey sıcaklık dağılımı; mühendisler, çevrebilimciler ve jeomorfoloqlar için önemli bir araştırma

alanıdır. Literatürde göllerdeki dikey sıcaklık dağılımının; rüzgâr etkisi, güneş ışınımı, mevsimsel ısınma ve soğuma, göle su girişi ve gölden su çıkışı gibi faktörlere bağlı olduğu sık sık dile getirilmektedir [1]-[3]. Göllerdeki karışma sürecine etki eden ana unsurlardan biri rüzgârın gölün yüzeyinde oluşturduğu kesme gerilimidir. Rüzgâra bağlı bu teğetsel gerilim, göl içinde dairesel bir hareket meydana getirir. Mevsimsel ısınma ve soğuma, göllerde termal tabakalaşmanın oluşmasını sağlar. Genel olarak kuzey yarım kürede, yaz aylarında göller üç ana tabakaya ayrılmış olur. Üst tabakaya epilimniyon, alt tabakaya hipolimniyon ve ortada kalan tabakaya ise metalimniyon ismi verilmektedir. Bu tabakaların kalınlıkları dış etkenlere ve gölün jeomorfolojik yapısına bağlıdır. İlkbahar ve sonbaharda, genellikle belirgin bir tabakalaşma meydana gelmez, başka bir deyişle gölün ısıyı iyi bir şekilde dağılmıştır ve her noktadaki sıcaklık neredeyse aynı değerdedir. Kış mevsiminde göl yüzeyinde bir buz tabakası oluştuğu durumlarda, bu tabaka rüzgârın teğetsel kesme etkisini engellediğinden dolayı su kütesindeki termal karışma engellenmiş olur.

Bu çalışmada çeşitli dış etkenlerin durgun bir su kütesindeki dikey sıcaklık dağılımına etkilerini gözlemlemek için suni bir

göl tasarımı göz önünde bulundurulmuştur. Parametrik çalışmada kullanılan sayısal model, Kuzey Galler'deki Llyn Cwellyn Gölü'ne ait gerçek veriler kullanılarak doğrulanmıştır [1]. Bu da bu ve benzeri yazılımların dış etkenler ölçülerek ve bölgesel kalibrasyonlar sonrasında Türkiye'de de kullanılabileceğini göstermektedir. Türkiye'de yapılabilecek ortak sayısal ve saha çalışmaları için önemli bir ilk adımdır.

Çalışmanın amacı; bir boyutlu sayısal analiz kullanılarak, basitleştirilmiş geometriye sahip suni bir göldeki suyun dış etkenlere bağlı sıcaklık değişimlerini çeşitli senaryolarla incelemektir. PROBE (Program for Boundary Layers in the Environment) isimli sayısal model Fortran tabanlı olup, bu çalışmada çeşitli senaryoları simüle etmek için kullanılmıştır. Bu yazılım, Svensson'un [4] orjinal çalışmasına dayanmaktadır ve İsveç Meteoroloji ve Hidroloji Enstitüsü (SMHI) tarafından birçok projede sıklıkla kullanılmıştır. Daha fazla bilgiye ve koda, SMHI'den ulaşmak mümkündür. Bu çalışma; rüzgâr hızı, Koriolis, içeri ve dışarı akım ile güneş ışınımı faktörlerinin göldeki dikey sıcaklık dağılımına etkisini anlamaya odaklanmıştır. Sayısal çalışmayı motive eden etkenler şöyle sıralanabilir;

- Belirli senaryolarla bir göl kenarındaki enerji santrali veya fabrikanın inşasından önce, işletme fazında oluşacak muhtemel sorunları ortaya çıkarabilmek,
- Laboratuvar deneylerinde oluşabilen ölçek hatalarının yazılım kullanılarak yapılan simülasyonda söz konusu olmaması,
- Tek boyutlu (1B) modellemenin çok hızlı sonuç vermesi. Böylelikle değişik senaryoları test etmede çok yararlı olması.

Çalışmada mevzu bahis olan tek boyut z-eksenidir, bir başka deyişle bu çalışmada değişkenlerin dikey dağılımları dikkate alınmıştır.

Çeşitli durumlar için yazılımın kalibre edilmesi büyük önem arz etmektedir. Birçok parametre içerisinde özellikle rüzgâr hızı, zaman aralığı ve gölün ışık geçirim katsayısı makul sonuçlar elde etmek için kalibrasyonda büyük öneme sahiptir. Kalibrasyon için rüzgâr hızı, güneş ışınımı ve göldeki dikey sıcaklık dağılımı gibi saha ölçüm verilerine ihtiyaç duyulmaktadır.

İlgi duyulan bölgede 1B yazılım ile yapılan kalibrasyondan sonra, uzun dönemde termik santral soğutma işlemlerinde gölden su çekme ve/veya güneş ışınımının göldeki termal şartlara etkisini araştıran mühendislik uygulamalarında büyük kolaylık sağlanmış olur. Yakın gelecekte Türkiye'de inşası planlanan Akkuyu Nükleer Santrali bu konuya örnek olarak verilebilir.

Göllerdeki akışkan hareketleri kompleks bir şekilde gerçekleşir. Bu durum göldeki fiziksel sistemlerin okyanus ve atmosferde olduğu gibi çok çeşitli olmasına neden olur. Diğer bir yandan göller farklı şekil ve boyutlara sahip olduğu için sınır etkileri de karmaşık bir hal alır. Rüzgârlar akımları etkiler, sıcaklık farklılıkları farklı derinliklerde değişik özkütleler ortaya çıkarır, göldeki çözünmüş madde miktarına bağlı olarak yoğunluklar çeşitlilik gösterebilir [5].

Göllerdeki karışma mekanizmaları özellikle inşaat ve çevre mühendisleri, biyologlar, çevre bilimciler ve hatta nükleer bir tesisin soğutma işlemlerinde kullanılacaksa, nükleer mühendisleri için önem arz etmektedir.

Göllerdeki ve rezervuarlardaki karışma tipik olarak su kütleindeki doğal tabakalaşmaya bağlıdır. Sıcaklık değişimi göldeki enerji dengesini tamamen etkiler.

Socolofsky ve Jirka [6] rüzgârın, karışma sürecinde ana dış etken olduğunu vurgularlar. Göldeki sisteme rüzgâr tarafından bir kinetik enerji girdisi olduğu takdirde göldeki potansiyel enerji tamamen yeniden yapılandırılmış olur. Rüzgâr göl yüzeyinde oluşturduğu kesme gerilimiyle süreci yönlendirir.

Spigel ve Imberger [2] rüzgârın oluşturduğu gerilimin, tabakalaşmış göllerde sirkülasyon ve dalga gibi büyük ölçekli hareketlenmeler oluşturduğunu göstermiştir. Rüzgâr aynı zamanda yüzeydeki suyu karıştırarak türbülans oluşturur, hipolimniondan epilimnionyona soğuk su geçişine yol açarak epilimnionyoyu iyice karışmış bir tabakaya çevirir. İkili, ayrıca türbülanslı kinetik enerji üretiminin bir boyutlu modelde, momentum denklemleriyle birlikte kullanılmasıyla sayısal analizde rüzgâr etkisinin daha kesin olarak gözlemlenebileceğini vurgular.

Su kütleleri içindeki özkütle farklılıkları sudaki kimyasal maddelerin değişimine neden olabilir ve bu değişimin göldeki yaşama direkt etki ettiği belirlenmiştir [7]. Sıcaklık ve çözünmüş maddeler sudaki özkütle farklılıklarına katkıda bulunurlar. İlık mevsimlerde, derin göllerde tabakalaşma gözlemlenmek mümkündür, soğuk mevsimlerde yüzeyde soğuyan su, aşağı doğru harekete başlayıp dikey sirkülasyon oluşmasını zorlayabilir, böylece bazı göllerde "overtorn" ya da "altüst olma" olayı gözlemlenebilir. Güneş ışınımı etkisi ile ısınan ve rüzgâr etkisiyle mekanik enerji kazanmış olan yüzeydeki ılık ve düşük yoğunluklu su kütleleri belirli bir derinliğe kadar bir karışıma neden olur. Yeterli miktarda derin olan göllerde, termal tabakalaşma sonbahar serinliğine kadar devam eder ve kış mevsiminde düşük sıcaklıklar, sirkülasyonu daha derinlerde gerçekleşmeye zorlar. Literatürde tanımlandığı gibi, epilimnion adı verilen yüzeydeki ılık su katmanı ve derinlerdeki soğuk su katmanı olan hipolimnion, keskin bir sıcaklık dağılımına sahip olan, termoklin adındaki ara katmanla birbirine bağlanmaktadır.

Termoklin, rüzgârın karıştırıcı mekanik etkisi ve güneş ışınımının sudaki geçirimliliğine bağlı olarak oluşur [6]. Termoklin ile beraber bir özkütle gradyanı da oluşmaktadır.

Darbyshire ve Edwards [1] çalışmalarında termoklinin sadece ısı girişi ile değil aynı zamanda mekanik enerji sayesinde şekillendiğini açıklamıştır. Bu mekanik enerji yerçekimine zıt etki gösterir ve ısınan özkütlesi azalmış suyun, soğuk ve özkütlesi artmış su ile yer değiştirmesini sağlar. Bunun yanısıra ısı girişi hava sıcaklığının su sıcaklığından fazla olduğu durumlarda kondüksiyon ile gerçekleşebileceği gibi güneşin ışınımından direkt olarak da ısı girişi oluşabilir. Direkt ısı kondüksiyondan daha etkilidir ve karşılaştırmada ikincisi ihmal edilebilir.

Literatürde yerel güneş ışınımını ölçmek için birçok çalışma mevcuttur. Türkiye'de de ışınım ölçümü ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır [8],[9]. Bu tür çalışmalar göller ile ilgili yapılan sayısal modeller için gerekli ve önemli girdiler sağlar.

Gölün boyutu, yaz mevsiminde oluşan termoklin derinliği ile direkt bir korelasyon içindedir. Güneşle ısınma derinlikle  $\beta^{-1}$  ölçek uzunluğunda üstel olarak azalır [10]. Burada  $\beta$  güneşle ısınmada ışık geçirim katsayısıdır.

Gölün berraklığı güneş ışığının geçirimliliğinde önemli bir faktördür [11]. Azalan berraklık, güneş ışığının derinlere doğru geçirimini azaltır, bu durum derinliklerde suyun

ısınımasını önleyerek dikey sıcaklık gradyanını ve su kolonu stabilitesini artırır. Bundan dolayı, bazı göllerde berraklık tabakalaşma üzerinde büyük etkilere sahiptir.

Kraus ve Turner [12] gölün derinliklerine doğru işleyen ışınmadan kaynaklı konvektif karışmanın ve mekanik karışmanın oluşum itibarıyla benzer şekilde gerçekleştiği sonucuna varmışlardır.

Bir göl veya rezervuardaki karışmayı aktive eden etkenler rüzgâr, içeri ve dışarı akımlar, güneş ışınm farkları ve kimyasal etkenler gibi günlük etkenlerdir [6].

Literatürde en sık yaşanan tartışma, sürecin yerinde, fiziksel olarak laboratuvarında veya sayısal modelleme ile değerlendirilmesi üzerinedir.

Göllerdeki değişikliklerin araştırılmasında sayısal modellemenin anahtar bir rolü vardır [13]. Göllerdeki dikey gradyanların yatay olanlara nazaran daha büyük olduğunu, kısa hesaplama zamanı ve birçok karışık duruma kolay uygulanabilir olduğu gerekçesiyle bir boyutlu modellemenin avantajlı olduğu vurgulanır. Jones ve diğ. [13] çalışmalarında PROBE'yi kullanmışlardır. Kod daha önce Avrupa'daki birçok gölde termal değişimler ve karışma süreçlerinin incelenmesinde kullanılmıştır. Çalışmalarındaki simülasyon sonuçlarının, ölçümle belirlenen sıcaklık değerleri ile gayet uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak, modelledikleri ve gözlemedikleri verilerin uyumlu olması nedeniyle PROBE'nin gelecekteki iklim değişikliklerinin göllere etkilerinin araştırılmasında önemli bir araç olacağını belirtmişlerdir.

PROBE yıllardır değişik alanlarda yaygın bir biçimde kullanılmıştır. Yazılım Erken Gölü'ndeki bitkisel planktonların incelenmesinde [14], göllerin yüzeyindeki buz oluşumunun modellenmesinde [15], Varmon Gölü'ndeki soğumanın simülasyonunda [16] ve Baltık Denizi'ndeki sıcaklık tahminlerinde [17] kullanılmıştır.

Sayısal modellemeye başka bir örnek ise Cannonsville Rezervuarı'nda termal şartlar çalışılırken kullanılan hidrotermal modeldir. Model ısı için konservasyon denklemleri, su hacmi ve türbülanslı kinetik enerji üzerine kurulmuştur [18]. Sayısal yöntem, bir boyutlu eşitliklerde, suyun dikey hareketi ve karışmanın yatay düzlemde tekbiçimli ve sadece dikey doğrultuda ve zamanla değişebilir olduğunu kabul eder.

Ekolojik su kalitesi modellerinde, su kütlelerinin aralıksız karıştırılması veya iki katmanlı sistem olarak kabul edilmesi taşınım ve karışma süreçlerini fazlasıyla basitleştirir [19]. California'da bulunan Mono Gölü'ndeki nütrient (besin) karışımını incelemek için bir boyutlu sayısal model kullanılmıştır [20]. Çalışmada, yukarı yönde oluşan nütrient akımı nedeninin türbülanslı girdapları olduğu belirtilmiştir. Yeates'in [21] çalışmasına göre, yüzeyinde teğetsel rüzgâr kuvveti olması durumunda, tabakalaşma oluşmuş derin göl ve rezervuarlardaki karışma, değişik türbülanslar oluşturarak su kütlesinde bir Ekman katmanı yaratır. Ekman katmanı, yüzeyde rüzgâr gerilmesi, Koriolis ve basınç gradyanları etkisi altında bir su sütunu boyunca oluşan spiral hareketli tabakadır. Bu Svensson'un [22] bulgularıyla benzerlikler taşır. Her iki çalışma da gösterir ki; türbülans, göl içinde kesme gerilimi dağılımını etkilediği için göl hareketlerinde dikkate alınmalıdır. Doğal bir su sisteminin jeokimyasal çalışması, zaman ve uzayda su hareketleri değişken olduğu için zamanla bir konsantrasyon alanının değişim oranını tanımlayan bir denklemde türbülanslı taşınım tahminlerini gerektirir [23].

Romero ve diğ. [24] bazı biyokimyasal süreçleri gözlemlemek için iki rezervuar üzerinde bir ve üç boyutlu modeller kullanmıştır. Bir boyutlu olan model PROBE ile benzerlikler göstermektedir. Bir boyutlu hidrodinamik model olan DYRESM kullanılarak göldeki ve rezervuardaki sıcaklık, tuzluluk ve yoğunluk simüle edilirken üç boyutlu model ELCOM ile göldeki iç dalgalar ve rezervuardaki taşkınlar gözlenmiştir. Taşkınlarda ve kompleks akımlarda parçacıkların hareketi, karışımlar ve çökeltmeler gibi akım dinamiklerini gözlemlemek için üç boyutlu modellere ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir.

Akkajaure gölüne ait termal yapı ile ilgili bir çalışmada bir modelin kalitesinin ancak onun rezervuarda saptanan gerçek termal profilleri yeniden üretme yeteneğine göre ölçülebileceğinden bahsedilir [16].

Perroud ve diğ. [25] derin perialpin Cenevre Gölü'ndeki su sıcaklık profillerinin gelişimini yeniden üretmek için tek boyutlu göl modellerinin uygunluğunu değerlendirmişlerdir. Bir boyutlu modellerin büyük ve derin göllere uygulanması ile ilgili bazı tartışmalar olsa da, atmosferik koşullar geniş su yüzeyi alanlarında heterojendir ve yatay adveksiyon ihmal edilirken, hafif kalibrasyonun ardından, modelleri, Cenevre Gölü'ndeki su sıcaklık profillerinin mevsimsel evrimini makul doğrulukta öngörmüştür.

Kinneret Gölü'nün termal dinamikleri de tek boyutlu DYRESM kullanarak simüle edilmiştir [26]. Simülasyonlar 45 aylık bir süreyi kapsar. Yine de yıl boyunca sabit ışık geçirim katsayısını kullandıkları öz eleştirisini yapmışlar, ancak kodun göldeki fiziği yakalayabildiği sonucuna varmışlardır.

Literatürde, bir göldeki termal değişikliklerin belirlenmesinde ışık geçirim katsayısının önemli bir parametre olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir. Daha büyük ışık geçirim katsayılarının başlangıçta yüzey sularının daha sıcak hale gelmesine neden olduğu ileri sürülse de [27], diğer birçok çalışma, ışık geçirim katsayısında bir artışın karışma derinliğinde bir azalmaya [28]-[32] aynı zamanda göldeki ısı içeriğinde de azalmaya neden olduğunu göstermiştir [33]-[35].

Türkiye'de son yıllarda göller ve termal özellikleri hakkında birkaç önemli çalışma yapılmıştır. Örneğin, Tahtalı Rezervuarı'nın hidrodinamik yapısını modellemek için yarı-üç boyutlu (yarı-3B) Çevresel Akışkan Dinamiği Kodu EFDC kullanılmıştır [36]. Rezervuardaki su kalitesinin iyileştirilmesi ile su uzaklaştırma çıkışının konumunun ilişkisi tartışılmıştır. Model kullanarak Tahtalı rezervuarında farklı sıcaklık profilleri ve farklı karışma işlemleri ile sonuçlanan dört farklı çıkış konumunu test edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalarda görüldüğü gibi sayısal modelleme göl sularındaki düşey profillerin incelenmesinde etkili bir uygulamadır. Bu çalışma yüksek sıcaklıktaki su salınımının göle etkilerini tek boyutlu bir sayısal yöntemle incelemektedir. Rüzgârın, güneş ışınmının, Koriolis'in etkileri değerlendirilmiş ve türbülanslı modellenmesinin önemli vurgulanmıştır.

## 2 Sayısal yöntem

PROBE tek boyutlu bir sonlu hacim yazılımıdır. Akışın hidrodinamiği ve karışım katsayıları k-ε model kullanılarak hesaplanır. Yazılım iki yönde momentum ve süreklilik denklemlerini çözer. Ayrıca, dört skaların konsantrasyonu, ısı enerjisi ve tuzluluk derecesinin özkütleyle etkisi de yazılım

içinde durum denklemleriyle ilişkilendirilebilmektedir. Türbülanslı karışım işlemleri türbülans değişim katsayıları ile tanımlanabilir. Bu tanım, Navier-Stokes Denklemlerinin (RANS) Reynolds Ortalamasına dayanmaktadır. Kısa dalgalı ışınının iç absorpsiyonunun üstel bir azalma kanununu takip ettiği varsayılmaktadır. Yer çekimi etkilerinin Boussinesq yaklaşımına uyduğu varsayılır. Dünya'nın dönüşünün etkisi, Koriolis parametresi  $f$  ile tanımlanır. Sınırlar arasında momentum taşınmasına izin verilmez [37].

- ❖ PROBE'de kullanılan tüm ana diferansiyel denklemler aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_{\phi} \quad (1)$$

Basitçe, Denklem 1 zamandaki değişimin difüzyon ve kütle giriş/çıkışına bağlı olduğunu gösterir. Burada,  $\phi$  bağlı değişken,  $t$  zaman,  $z$  dikey koordinat,  $x$  yatay koordinat,  $u$  yatay hız,  $\Gamma_{\phi}$  değişim katsayısı ve  $S_{\phi}$  ise madde girişi ve/veya çıkışı terimidir. Yazılımda düşey yönde adveksiyon su giriş/çıkışının farklı derinliklerde olduğu durumlarda momentum denklemlerine eklenen bir terim ile modellenir [38]. Su giriş/çıkışının aynı derinlikte gerçekleştiği ya da mevcut olmadığı durumlarda adveksiyon ile momentum taşınımının, düğümlerin belirlediği hücrelerin sınırları arasında gerçekleşmediği varsayılır.

- ❖ Momentum denklemleri;

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_{eff} \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} \right) + f_{pv} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_{eff} \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} \right) - f_{pv} \quad (3)$$

Burada  $t$  zaman koordinatını,  $x$  ve  $y$  yatay uzay koordinatlarını,  $z$  dikey uzay koordinatını,  $u$  ve  $v$  sırasıyla  $x$  ve  $y$  doğrultularındaki yatay hızları,  $p$  basıncı,  $f$  Koriolis parametresini ve  $\rho$  özkütleyi temsil eder. Kinematik efektif viskozite  $v_{eff}$ , türbülans viskozitesinin,  $\nu_{\tau}$ , laminar viskozite,  $\nu$  ile toplamıdır. Türbülansın ihmal edilmesi durumunda  $v_{eff}$  laminar viskoziteye eşittir. Bu sıvının bir özelliğidir. Türbülans modeli kullanılarak  $\nu_{\tau}$  değeri elde edilir. Türbülans viskozitesi,  $\nu_{\tau} = C_{\mu} k^2 / \epsilon$ , olarak hesap edilir.  $C_{\mu}$  ampirik bir sabittir. Bu çalışmada  $k-\epsilon$  tipi bir türbülans modeli kullanılmıştır. Türbülans modelinin ana denklemleri Denklem 4 ve 5'te verilmiştir.

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + v_{\tau} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + P_b - \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_{eff}}{\sigma_{\epsilon}} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + C_{3\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_b - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

Burada  $P_b$  kaldırma etkisi ile enerji üretimidir.  $P_b$  hesaplanırken ısının etkisi göz önünde bulundurulmuştur.  $\sigma$  değerleri ve  $C$  değerleri modelde kullanılan ampirik sabitlerdir [39]. Isının zamana ve derinliğe bağlı değişimi Denklem 6'da verilmiştir.

- ❖ Isı Enerjisi denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) = \frac{\partial}{\partial z} \left( v'_{eff} \frac{\partial}{\partial z} (\rho c_p T) \right) + R(1 - \eta) e^{-\beta(D-z)} \quad (6)$$

Denklemden sıcaklık  $T$  ile gösterilirken,  $c_p$  özgül ısı,  $v'_{eff}$  ısı için efektif difüzyon toplamı,  $R$  gelen kısa dalgalı ışınımı,  $\eta$  yüzeyde absorbe edilen  $R$  fraksiyonunu, ve  $\beta$  ışık geçirim katsayısını gösterir. Durum denklemlerine göre sıcaklık ve özkütle arasında ikinci dereceden bir ilişki vardır.

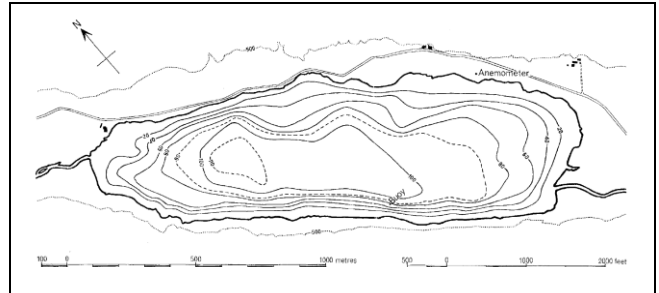
### 3 Simülasyonlar

#### 3.1 Kod doğrulama çalışması

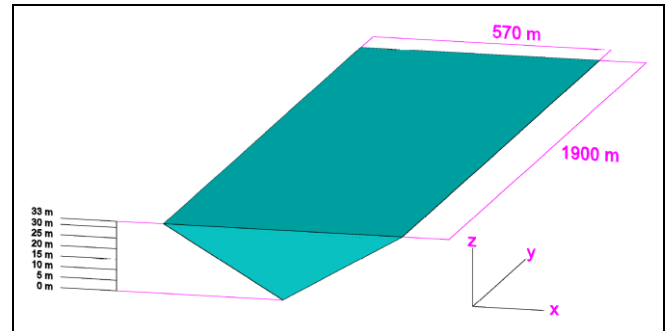
Llyn Cwellyn Gölü'nün gerçek batimetrisi Şekil (1b)'de verilmiştir ve göl, Şekil 2'deki gibi basitleştirilmiştir. Üçgen kesitli bir gölde, başlangıçta, yüzeydeki ılık su hacmi tabana yakın olan soğuk su hacmine kıyasla daha fazladır. Bu nedenle üçgen kesitli göller uç bir jeomorfolojik ortam gözlemlemek için idealdir.



Şekil 1(a): Llyn Cwellyn gölünün Google Earth görüntüsü.



Şekil 1(b): Llyn Cwellyn gölünün batimetrik haritası [1].

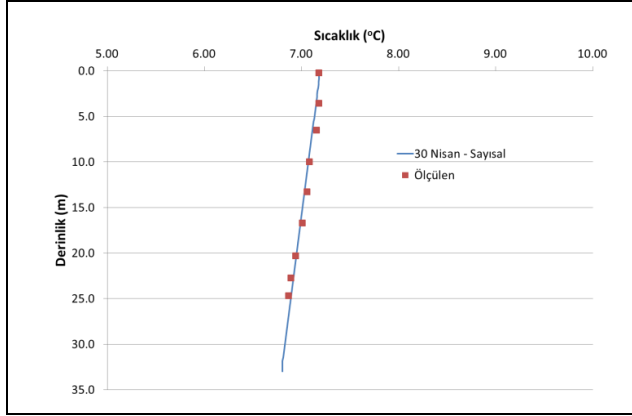


Şekil 2: Üçgen en kesitli gölün sadeleştirilmiş çizimi.

Kodun termoklin gelişimini simüle edebilme yetisini doğrulamak için Darbyshire ve Edwards'ın [1] çalışması referans olarak kabul edilmiştir. Çalışmada Galler'de bulunan Llyn Cwellyn Gölü'nde yaz aylarında gözlenen termoklin oluşumu açıklanmıştır. Göldeki saha ölçüm verileri 1966 yılının Mayıs ayından Kasım ayına kadar olan verilerdir. Çalışmada vadideki rüzgâr hızları ve günlük hava

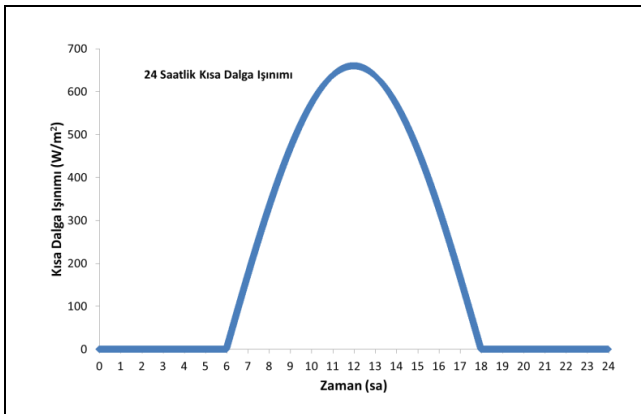


sıcaklıklarının 1966 yılının Hava Bakanlığı Günlük Hava Raporu'ndan alındığı vurgulanır. Maalesef bu rapor sayısal modelleme için elde edilememiştir. Birleşik Krallık Meteoroloji Ofisi, vadide, 1966 yılındaki aylık ortalama en yüksek ve en düşük sıcaklıkları o aydaki ortalama güneş alma saatlerine göre sunmaktadır. Güneş alma saatleri o aydaki güneşin gözlemlendiği saatleri göstermektedir. Bu bilgiler ışığında kod, kısa dalgalı ışıma ve rüzgâr hızları kullanılarak kalibre edilmiştir. 30 Nisan'da gölde ölçülen sıcaklık profili yazılımda başlangıç sıcaklık profili olarak tanımlanmıştır. Bu başlangıç profili Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Llyn Cwellyn Gölü'ne ait 30 Nisan 1966'de ölçülen başlangıç sıcaklık profili. Kırmızı kareler saha ölçümlerini, mavi çizgi ise koda verilen profil girdisini belirtmektedir.

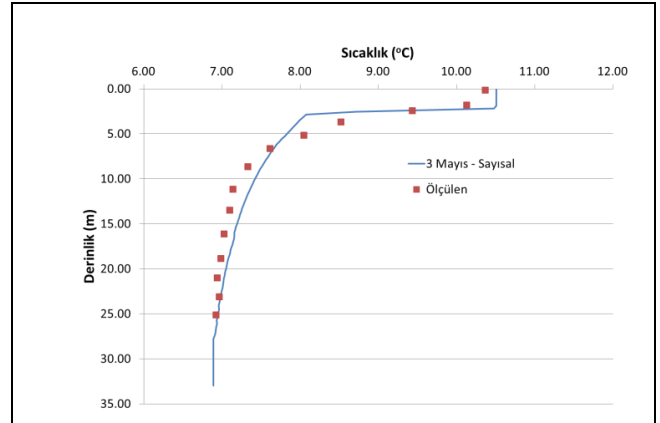
Yazılım ayrıca bir ışık geçirim katsayısı tanımlanmasına da ihtiyaç duymaktadır. Bu durum, gelen kısa dalgalı ışımanın sadece belli bir kısmının yüzeyde absorbe edildiği varsayımına dayanmaktadır. Başka bir deyişle, ışık geçirim katsayısı ( $\beta$ ) gölde derinliklere doğru devam eden kısa dalgalı ışımayı tanımlar. Göldeki ışık geçirim katsayısı 0.14 olarak alınmıştır. Kısa dalgalı ışımanın (SRAD) öğle saatinde maksimum, sabah erken ve akşam geç saatlerde minimum değer alan bir sinüzoidal eğri olduğu kabul edilmiştir ve bu durum Şekil 4'te verilmiştir. Yazılımdaki doğrulama çalışmalarında zaman aralığı (time step) 10s olarak alınmıştır. İki ayrı model kurulmuştur. Kısa vadeli model Mayıs 1966'nın ilk üç günlük sıcaklık değişimi profilini yakalamak için oluşturulmuştur. Uzun vadeli model ise 10 Ağustos'taki sıcaklık değişim profilini yakalama amacıyla kurulmuştur. Tüm doğrulama çalışmalarında türbülans etkisi k- $\epsilon$  yöntemi kullanılarak modellenmiştir.



Şekil 4: Koda girdi olarak verilen 24 sa.'lik kısa dalgalı ışımanın sinüzoidal değişimine bir örnek.

Bu noktadan itibaren çalışmada sunulan tüm düşey sıcaklık profillerinde sıfır derinlik gölün serbest yüzeyini göstermektedir.

İlk simülasyonda yazılım; kalibre edilmiş rüzgâr hızı, ışık geçirim katsayısı ve kısa dalgalı ışıma etkisi altında üç günlük süre için çalıştırılmıştır. Şekil 5'te, 3 Mayıs 1966'daki ölçüm sonuçları, sayısal analizden elde edilmiş olan profil ile kıyaslanmıştır. Mayıs 1966'nın ilk üç gününde güçlü bir rüzgâr dikkate alınmamıştır. Yazılımın momentum denklemlerini aktive etmek için küçük bir yüzey akısı verilmiştir. Kısa dalgalı ışıma (SRAD) değeri  $210 \text{ W/m}^2$  olarak alınmıştır. Bu değerlerin rüzgârsız sıcak bir bahar zamanını temsil ettiği varsayılabilir. Şekil 5'te görüldüğü gibi, SRAD,  $\beta$  ve rüzgâr hızının kalibre edilmiş değerleri ile yazılım, sahada ölçülen sonuçları üretebilir. Bu şekilde görülebileceği üzere, serbest yüzeyde küçük bir bozulma ve yüzey ısınması ile göl serbest yüzeyinin ilk birkaç metre altında yüksek su sıcaklığı değerleri ile bir termoklin oluşmaya başlar. Başlangıç profili gölde iyi karışmış bir sıcaklık koşulunu temsil etse de, 33 m derinliğe sahip bir göldeki sıcaklık, üç günlük sürede ışıma etkisi ile oldukça önemli ölçüde değişebilir.



Şekil 5: Sayısal Sonuç (mavi çizgi) 3 Mayıs 1966 tarihli saha ölçüm verileri (kırmızı kareler) ile kıyaslanmıştır. Başlangıç koşulu Şekil 3'te tanımlanmıştır.

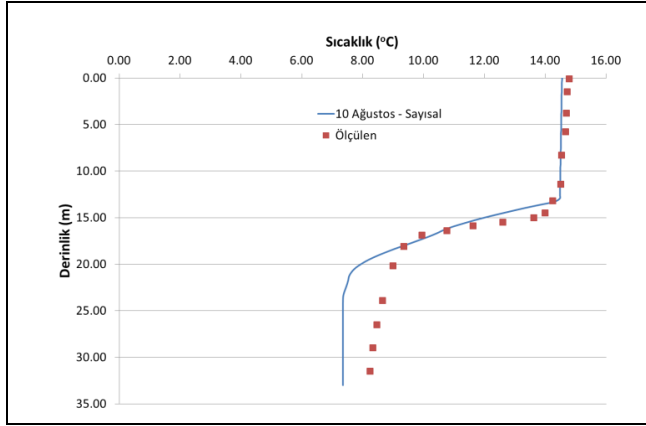
Bu bağlamda, dış koşullar bir göl alanı etrafında düzgün bir şekilde ölçülürse, göldeki olası sıcaklık değişimleri bu 1B yazılımı kullanılarak tahmin edilebilir. Mevcut girdinin detayına bağlı olarak, göldeki sıcaklık profilindeki günlük değişim yakalanabilir.

Ne yazık ki günlük rüzgâr ve güneş ışımasını değişimi 1966 yılı için bu gölde mevcut değildir. Bu nedenle günlük değişimler yerine ortalama veriler ile 10 Ağustos 1966'da gözlemlenen termoklin yakalanmaya çalışılmıştır. Uzun vadeli bir analiz gerçekleştirilmiş, hız ve ortalama kısa dalgalı ışıma değeri 30 Nisan - 10 Ağustos 1966 arasındaki sürede simüle edilmiştir. Bu uzun vadeli çalışmada ilk sıcaklık profili değiştirilmemiştir ve Şekil 3'teki gibi alınmıştır. Bu profil ile başlayarak yazılım yaklaşık yüz günlük bir süre için çalıştırılmıştır. SRAD'ın ortalama değeri bu süre zarfında  $45 \text{ W/m}^2$  alınmıştır. Yüzeyde x ve y yönlerinde ortalama rüzgâr hızı  $0.012 \text{ m/s}$  olarak kabul edilmiştir. Işık geçirim katsayısı da 0.14'te değişmeden tutulmuştur. Şekil 6, Ağustos ayında gözlenen termoklin genel trendinin sayısal model yoluyla yeniden oluşturulabildiğini göstermektedir. Simülasyon sonuçları, uzun süreli ortalama rüzgâr hızı ve SRAD değeri kullanılarak, 10 Ağustos tarihli sıcaklık profilinin 100 günlük uzun bir simülasyonda elde edilebildiğini göstermektedir.

Bununla birlikte, Nisan ve Ağustos ayları içinde belirli bir tarihte göl suyu sıcaklığının değişimini doğru bir şekilde tahmin edebilmek için rüzgâr ve güneş ışınımının ayrıntılı değişimi yazılıma girilmiştir.

Doğrulama çalışmalarında Koriolis'in etkisi de dikkate alınmıştır. Gölün bulunduğu enleme bağlı olarak,  $f$  değeri  $1.221 \times 10^{-4}$  rad/s olarak kabul edilmiştir.

Üç günlük bir süre içerisinde sıcaklık profilindeki değişikliğe bakan kısa süreli simülasyon, basit bir dizüstü bilgisayarda yaklaşık 7 dk. alırken; yüz günlük bir süreyi kapsayan uzun simülasyon aynı bilgisayarda yaklaşık 25 dk. sürmektedir.



Şekil 6: Sayısal Sonuç (mavi çizgi) 10 Ağustos 1966 tarihli saha ölçüm verileri (kırmızı kareler) ile kıyaslanmıştır. Başlangıç koşulu Şekil 3'te tanımlanmıştır.

Bu simülasyonlarda, dikey yöndeki düğüm sayısı (N) 100 olarak alınmış ve sonuçların tatminkar bir şekilde eşleştiği gözlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmadaki diğer tüm uygulamalarda N değeri 100 olarak alınmıştır.

Bu doğrulama, farklı senaryolarda su kütlelerindeki sıcaklık değişikliklerinin hızlı bir şekilde tahmin edilmesi için PROBE'nin uygulanabilirliğini göstermektedir. Doğrulama işlemlerini takiben, Llyn Cwellyn Gölü'yle aynı boyuttaki yapay bir gölün, bir enerji santrali için soğutma suyu kaynağı olarak kullanıldığı senaryolar üretilmiştir. Türbülansın etkisinin daha net görülebilmesi için bu senaryolarda ilk etapta türbülans modeli kullanılmamıştır. Daha sonra türbülansın göl suyunun karışmasına etkileri tartışılmıştır.

Detaylı saha ölçümleri ile benzer 1B sayısal çalışmalarının Türkiye'deki termik santrallerin soğutma suyu işlemlerinin takibinde ve operasyonel senaryoların değerlendirilmesinde kullanılması mümkündür. Ancak sahada detaylı rüzgâr, termal profil, ışık geçirimi ölçümlerinin yapılmış olması yazılımın bölgesel kalibrasyonu için çok önemlidir. Bu çalışmayla böyle mühendislik uygulamalarında saha çalışmaları ve sayısal modelleme işbirliklerinin Türkiye'de daha yaygın gerçekleşeceği de umulmaktadır.

### 3.2 Türbülansın ihmal edildiği su giriş/çıkış senaryoları

Bu senaryolarda durgun su kütlelerine yüksek sıcaklıktaki suyun salınmasına odaklanılmıştır. Karışım süreçlerinde göle salınan yüksek sıcaklıktaki su ve düşük sıcaklıktaki suyun çekilmesi etkisi incelenmiştir.

Simülasyonlarda, su giriş ve çıkışlarının yerleri değişkendir. 10 Ağustos tarihli Şekil 6'daki termoklin, başlangıç sıcaklığı dağılımı olarak kullanılmıştır. Üç farklı lokasyonda giriş ve

çıkış akışı değerlendirilmiştir. Boşaltılan suyun sıcaklığı 35 °C'yi geçmemelidir [40]. Bu nedenle, çıkış suyu sıcaklığının 33 °C olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, orta büyüklükteki bir nükleer reaktör için gereken soğutma suyunun debisi 24 m<sup>3</sup>/s olarak belirlenmiştir [40].

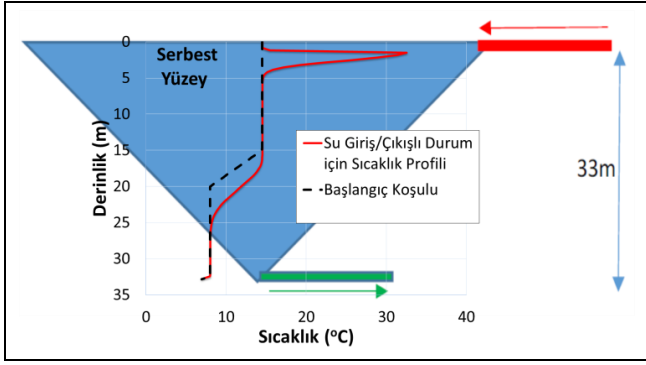
Durum 1'de, sıcak su rezervuara hemen hemen serbest yüzeyden salınmakta ve soğuk su alma rezervuarın tabanında gerçekleşmektedir. Durum 2'de, hem giriş hem de çıkış termoklin merkezinde, rezervuarın orta derinliğinde bulunmaktadır. Son durumda, sıcak su girişi, orta derinliktedir ve soğuk su çıkışı tabandadır. Simülasyon süresi 24 sa.'tir, simülasyonlarda zaman aralığı (time step) 1 saniye olarak alınmıştır ve güneş ışınımının ısıtma etkisi ve rüzgâr, su giriş/çıkışının etkisini görmek için ihmal edilmiştir. Bu simülasyonlarda türbülans etkileri de göz ardı edilmiştir. Rüzgâr etkilerinin ve ışınımın yok sayıldığı durumlarda sıcak su girişi ve soğuk su çıkışının etkilerinin sadece laminer koşullarla irdelenmesi ilk etapta simülasyonların basitleştirilmesi olarak düşünülmüştür.

Durum 1, Şekil 7'de gösterilmiştir. Enerji santrali soğutma sistemlerinin rezervardan su çekmesi ve rezervara su bırakması düşünülürse, bu gerçekçi bir senaryo olabilir. Serbest yüzeyin yakınında, sıcaklık 18.5 °C'ye kadar artmıştır. Serbest yüzeyin altındaki ilk 5 m boyunca, sıcaklık 24 sa. içinde ani değişime uğramıştır. Bu aynı zamanda termoklinin yapısını da etkilemiştir. Örneğin başlangıçta 22 m derinlikteki suyun sıcaklığı 8 °C civarındadır; bu sıcaklık 24 sa.'te 10.85 °C'ye yükselmiştir.

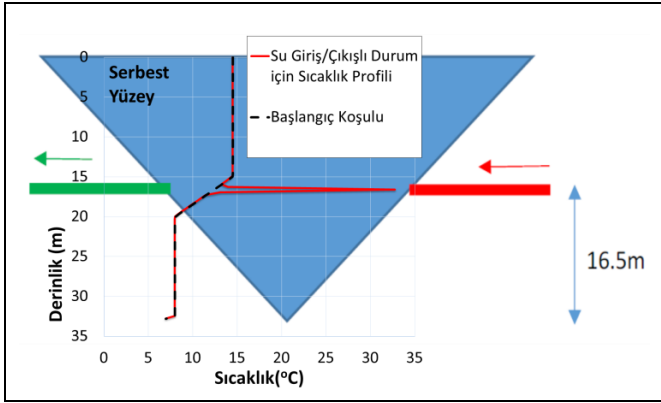
Şekil 8'de gösterilen ikinci durum, ilk durum kadar gerçekçi değildir. Suyun serbest bırakılması ve geri çekilmesi aynı derinlikte gerçekleşmiştir. Bu durum, termoklin üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir ve soğutma suyu sıcaklığı oldukça önemli ölçüde artabileceği için, tesis işletmesinde istenmemektedir. Ani sıcaklık değişimi, termoklin üzerindeki 1 metrelik derinlikte gerçekleşmiştir. Aynı zamanda bu durum literatürde "turnover" olarak nitelendirilen duruma neden olur. Isınan su daha düşük yoğunlukta olduğu için yüzeydeki su ile yer değiştirmesi gerekir. Bu da suyun salındığı derinlikle serbest yüzey arasında rotasyona neden olur. Bu sebeple bu tür bir su salınımı su kütlesi içinde dengesiz bir durum yaratır.

Şekil 9'da görülen son durumda, termoklin bölgesindeki sıcaklıktaki hızlı artış, göldeki yaşam için zararlıdır ve sıcaklık değişimi, bu durumda Şekil 7'de verilen duruma kıyasla çok daha geniştir. Simülasyonlarda, sıcak suyun, girişinin yerinde ve çevresinde sıcaklığın hızlı bir şekilde değişmesine neden olduğu gözlenmektedir. Sonuncu durumda da ikinci durumdaki gibi su kütlelerinde dengesiz bir tabakalaşma oluşur. Sıcak su, soğuk su ile yer değiştirmek zorundadır. Bu da rotasyonel bir akıma ve bunun sonucu olarak yapay gölde türbülansa neden olur. Bu durumda daha gerçekçi sonuçlar için türbülans modellemesi uygun olacaktır. Türbülansın yok sayıldığı durumlarda sıcak su girişinin olduğu yerlerde Şekil 7, 8 ve 9'da olduğu gibi lokal uç değerler gözlenir. Isının yayılımı laminer yollarla gerçekte gözlenenenden çok daha yavaş gelişir. Bu sebeple sıcak su girişi bulunduğu derinlikte gerçekte gözlenenenden daha uç sonuçlar verir.

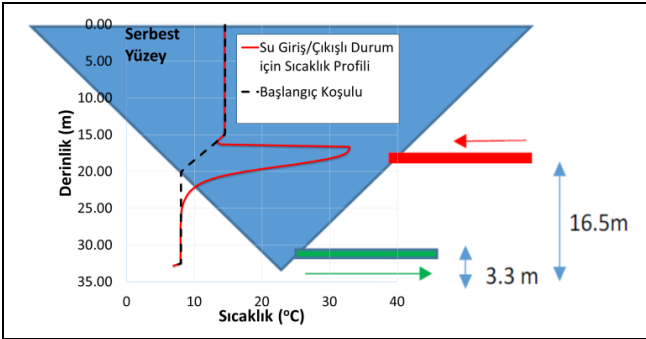
Bu bölümdeki son iki simülasyonda, kısa dalgalı güneş ışınımı etkileri, su kütlelerinin dikey sıcaklık dağılımı üzerindeki giriş ve çıkış etkileriyle birleştirilmiştir. Yine türbülans ihmal edilmiştir.



Şekil 7: Gelen akımın yüzeyde ve giden akımın tabanda olması durumunda 24 sa.'lik dikey sıcaklık dağılımı (Durum 1).



Şekil 8: Gelen akımın ve giden akımın orta derinlikte olması durumunda 24 sa.'lik dikey sıcaklık dağılımı (Durum 2).

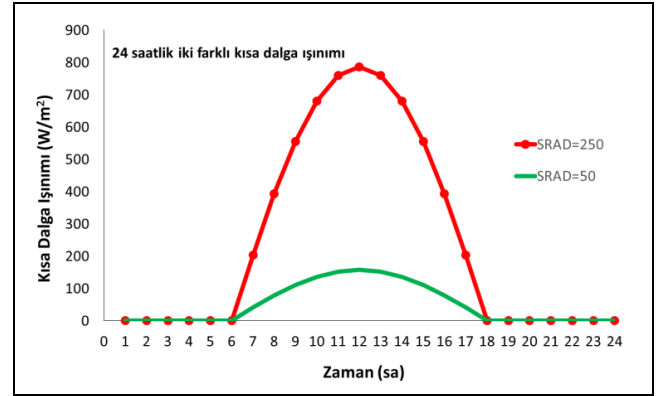


Şekil 9: Gelen akımın orta derinlikte ve giden akımın tabana yakın olması durumunda 24 sa.'lik dikey sıcaklık dağılımı (Durum 3).

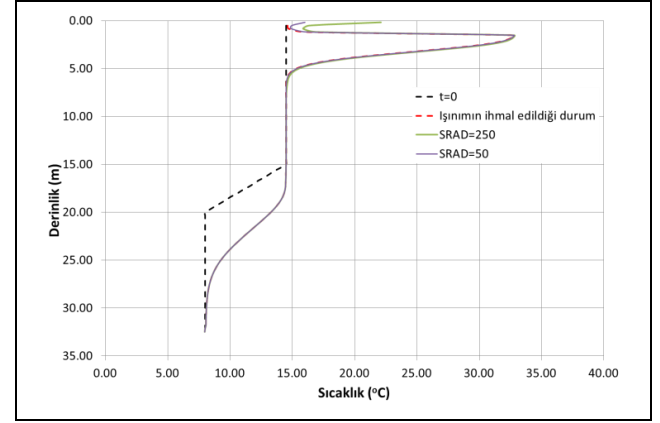
250 W/m<sup>2</sup> ve 50 W/m<sup>2</sup> olmak üzere iki ortalama kısa dalgalı ışınım Şekil 10'da gösterilmiştir. Simülasyon 24 sa. sürdürülmüştür. Başlangıç koşulları Durum 1 ile aynıdır. Güneş ışınımı öğle vakti zirveye ulaşır, güneş ışınımının günlük etkisi bir sinüzoidal değişim kullanılarak değerlendirilir. Bu değişim Şekil 10'da gösterilmiştir. Saat 18.00'ten sonra gün batımı nedeniyle güneş ışınımının büyüklüğü sıfır değerini alır.

Şekil 11'de görüldüğü gibi, kısa dalgalı ışınımın dahil edilmesi, serbest yüzeyde su sıcaklığını önemli ölçüde etkiler. Başlangıç koşulu şekilde t=0 olarak görülmektedir. Türbülansın ihmal edildiği durumlarda sıcak ve soğuk su arasındaki etkileşim sadece moleküler düzeyde gerçekleşir etkin vizkozite moleküler olandır. Bu sebeple yerel (lokal) etkilerin yayılımı gerçekte gözlenen yayılıma kıyasla daha yavaştır. Bu sebeple

türbülansın ihmal edildiği simülasyonlarda yüzeydeki ısımanın etkisi 24 sa. içinde tüm derinlik boyunca fark edilir bir etki göstermemiştir.



Şekil 10: SRAD: 250 W/m<sup>2</sup> & 50 W/m<sup>2</sup> olmak üzere iki farklı büyüklükte olan kısa dalgalı ışınımının 24 sa.'lik sinüzoidal değişimi.



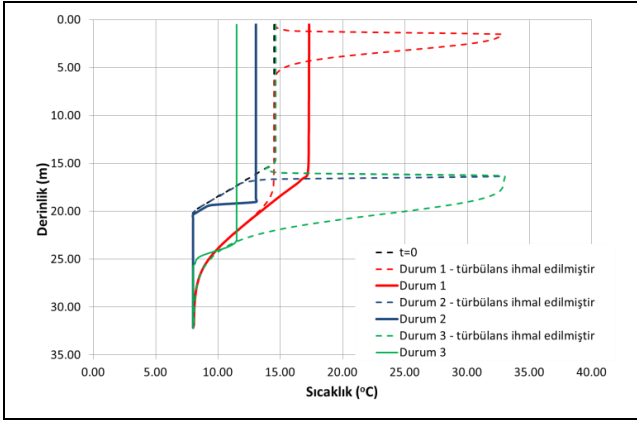
Şekil 11: Gelen akımın yüzeye ve giden akımın tabana yakın olması durumunda 24 sa.'lik dikey sıcaklık dağılımı. Yüzeyde iki farklı güneş ışınımı büyüklüğü dikkate alınmıştır.

### 3.3 Türbülans, Güneş ışınımı ile ısınma ve rüzgâr etkileri

Sıcaklık farkının olduğu ortamlarda yoğunluk farkı nedeniyle akım oluşur. Bu bölümde yukarıda bahsi geçen Durum 1, türbülans, ışınım ve rüzgâr etkileri eklenerek yeniden değerlendirilmiştir. Durum 1 santrallerin çalışma koşulları açısından daha gerçekçi olduğu için bu durum her üç etki göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Türbülansın etkileri Durum 2 ve Durum 3 için ışınım ve rüzgâr etkileri ihmal edilerek sunulmuştur. Türbülans k-ε yöntemi ile modellenmiştir.

Şekil 12'de türbülansın sıcak su giriş ve çıkışının değerlendirildiği simülasyonlardaki etkisi görülmektedir.

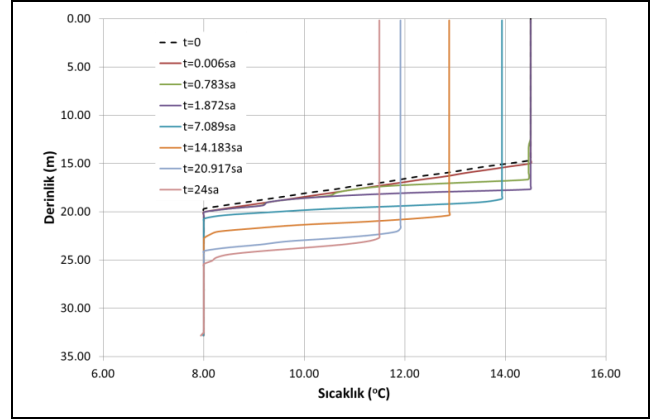
Türbülansın göz önünde bulundurulmadığı durumlarda yüzeye yakın salınan (şekilde kırmızı kesikli çizgilerle gösterilmiştir) sıcak suyun yerel (lokal) sıcaklığı arttırdığı ve ortam ile karışımın az olduğu görülür. Aynı oluşum, orta derinlikte salınan durumlar için de geçerlidir. Türbülans modellemesi ile etkin vizkozite hem türbülans hem de moleküler etkilerin bir arada hesaplanması ile elde edilir.



Şekil 12: Giriş/çıkışın türbülanslı modellenmesi ile 24 sa. içinde sıcaklık profillerindeki değişim. Durum 1 kırmızı, Durum 2 mavi ve Durum 3 yeşil çizgilerle gösterilmiştir. Kesikli çizgiler türbülansın ihmal edildiği modellerdir.

Bu durumda karışma işlemi hızlanır. Bu gerçek hayatta gözlenen duruma daha uygundur. Çünkü sıcak su özkütlesinden dolayı doğal olarak yüzeye ulaşmak isterken soğuk su da dibе çökmektedir. Aynı zamanda gölün şekli de tabakaların türbülans ile değişiminde önemli bir rol oynar. Simülasyonlarda daha önce de belirtildiği gibi düzeyde 100 düğüm kullanılmıştır. Her düğüm göl içinde belirli bir tabakayı temsil eder ve her bir düğümün sahip olduğu hacim gölün genel şekliyle bağlantılıdır. Bu sebeple Şekil 2'den de anlaşılacağı gibi serbest yüzeye yakın düğümlerin temsil ettiği hacimler daha yüksek buna karşın tabana yakın düğümlerin sahip olduğu hacimler daha küçüktür. Bu da salınan sıcak suyun yükselirken ya da çekilen soğuk suyun dibе çökerken yer değiştirdiği hacimlerle düşey profilin önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Türbülans ile birlikte Durum 1'de lokal artış yerine bir katman boyunca sıcaklık artışı gözlenir. Şekilde kalın kırmızı çizgi ile gösterilen profile yüzeyden ilk 18 metre derinliğe kadar sıcaklıkta toplu bir artış gözlenmiştir, bu türbülansın ihmal edildiği durumdan çok farklıdır. Türbülansın modellenmesi ile yapay gölde yeni bir termoklinin 24 sa. içinde oluştuğu görülmüştür. Yüzeyde sıcaklığın arttığı gözlenmekte su giriş çıkışı tüm derinlik üzerinde sıcaklık profilini etkilemektedir. Yeni profil başlangıçtan (t=0) itibaren tüm derinlik üzerinde farklılık göstermekte, yalnızca tabanda herhangi bir değişiklik görülmemektedir. Dengesiz tabakalaşmanın görüldüğü Durum 2 ve Durum 3'te türbülansın hesaba katıldığı iki simülasyonda az yoğun sıcak su 24 sa. içinde yüzeydeki daha yoğun soğuk su tabakası ile dolaşıma girer ve karışır. Böylece şekilde görülen yeni termoklinler oluşur. Yüzeyde sıcaklığın önemli ölçüde azaldığı ama termoklin üzerinde başlangıç koşulundaki (t=0) termokline kıyasla sıcaklığın önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Özellikle Durum 2'de tabandan 13 metre mesafede başlangıç koşullarında sıcaklık yaklaşık 9 °C iken, yeni durumda karışmanın etkisi ile yeni sıcaklık 14 °C ulaşmıştır. Durum 2'de santrale su giriş çıkışı aynı derinlikte gerçekleşmektedir, bu uygulamada sık rastlanan bir durum değildir. Durum 3'te santrale soğuk su alımı tabana yakın bir noktadan gerçekleşirken, sıcak su salınımı orta derinliktedir. 24 sa. içinde türbülansın etkisi ile yüzeyden tabana kadar olan ilk 23 m.'de homojen karışmış bir tabaka oluşur. Bu tabakada su sıcaklığı başlangıç koşullarından daha soğuktur. Bu da yukarıda bahsedildiği gibi karışımın gerçekleştiği yüzeye yakın tabakaların hacmi ile ilişkilidir. Yüzeye yükselen sıcak

su, yüksek hacimli soğuk suyun dibе çökmesini tetikler, bu sebeple daha büyük hacme sahip soğuk su ile karışan sıcak su etkisini önemli ölçüde yitirir. Sıcak su salınımı ile dengesiz hale gelen su kütlesi 24 sa.'lık döngü sonucunda karışır, bu durum tüm su kütlesindeki sıcaklık dağılımını etkiler. Daha uzun süreli simülasyonlarla sıcak su salınımının etkisinin uzun vadeli etkileri araştırılabilir. Simülasyonlar türbülans etkisinin sıcak ve soğuk su etkileşimlerinin incelendiği çalışmalarda ihmal edilmemesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle dengesiz tabakalaşmanın oluşabileceği durumlarda türbülans önem kazanmaktadır, karışımın doğru nitelendirilmesi açısından türbülanslı modellerde küçük zaman aralığı kullanılmıştır. Bu tek boyutlu hesaplamaların kararlı durumda ilerlemesi için gereklidir. Oluşan döngüsel akımlar yüksek türbülanslıdır ve kısa zamanda düşey sıcaklık profilinde büyük değişikliklere neden olurlar. 24 sa. içinde profile gözlenen değişim Durum 3 için Şekil 13'te sunulmuştur. Yapay gölün sirkülasyon ile karışması ile başlangıçtaki termoklinin sıcaklık koşulları değişmiştir. Örneğin Şekil 13'te görüldüğü gibi tabandan 11 m.'de başlangıç sıcaklığı 8 °C iken 24 sa. sonunda bu değer 11.5 °C'ye ulaşmıştır. Başka bir deyişle salınım lokal değil tüm termoklin üzerinde etkisini göstermiştir.



Şekil 13: Giriş/çıkışın türbülanslı modellenmesi ile 24 sa. içinde durum 3 için düşey sıcaklık profilinin değişimi. Kesikli çizgi başlangıç koşulunu göstermektedir.

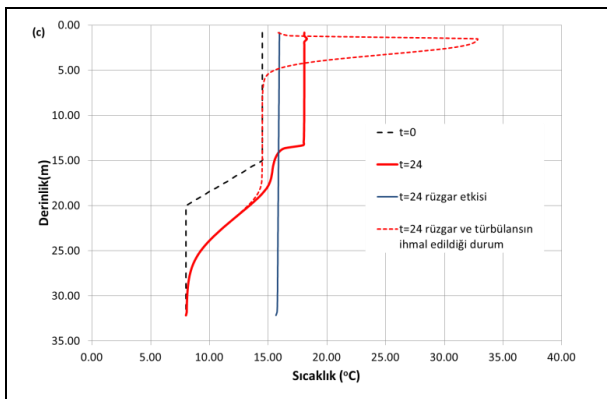
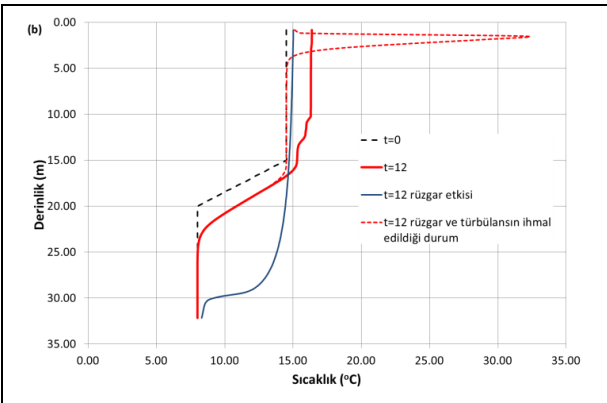
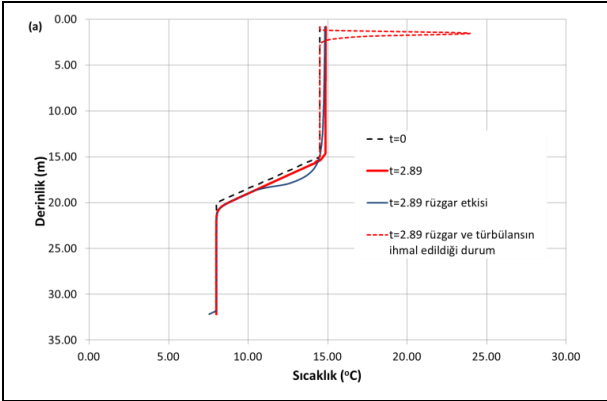
Şekil 14'te sıcaklığın derinlikle değişimi farklı zamanlarda üç ayrı simülasyon için sunulmuştur.

Şekil 14'te sıcaklığın derinlikle değişimi farklı zamanlarda üç ayrı simülasyon için sunulmuştur. Yüzeyde güneşin ışınım etkisinin türbülansla modellenerek değerlendirildiği simülasyon şekilde kalın kırmızı çizgi ile gösterilmiştir. Bu simülasyonda kısa dalgalı ışınım 250 W/m<sup>2</sup>'ye eşittir. Aynı simülasyon türbülans etkisi ihmal edildiğinde ise kırmızı kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi türbülans etkisi yok sayıldığında yüzeye yakın sıcak su girişinin etkisi zaman ile katlanarak artar ve yüzeye yakın sıcak suyun ortam ile karışımı gerçekçi değildir. Işınımın etkisinin de yüzeyden tabana doğru yayılmadığı görülmektedir. Gerçek hayatta türbülans etkisi ile sıcak su ortam sıvısı ile karışmalı ve β'ya bağlı olarak ışınım etkisi yüzeyden tabana doğru yayılmalıdır. Türbülans göz önünde bulundurulduğunda sıcaklığın derinlikle değişimi daha gerçekçi bir hal gösterir. Lokal abartılı değerler yerine ışınımın ve sıcak su girişinin yüzeyden ilk 18 metrede sıcaklık artışına neden olduğu görülmüştür. Karışım değerleri yüzeyden ilk 18 metrede 18 °C civarındadır. Işınımın ve sıcak su girişinin 24 sa. içinde termoklini değiştirdiği görülmüştür. Türbülansın etkisi



## 4 Sonuçlar

24 sa.'lik simülasyonlarda tabandan ölçülen ilk 15 metrede büyük önem göstermemektedir. Rüzgârın etkisinin eklendiği (mavi kalın çizgi) simülasyonda ise rüzgârın yüzeydeki hızı 1km/sa olarak kabul edilmiştir. Bu Beaufort sayısı 1 olan bir rüzgâr türüne eşittir. Rüzgârın 24 sa. boyunca etkili olduğu varsayılmış ve rüzgârın mekanik etkisi ile karışımı hızlandırması sonucunda 24 sa. içinde yapay göldeki suyun sıcaklığı Şekil 14'de görüldüğü gibi homojen bir hal almıştır. Rüzgârın karışım etkisi Şekil 14(b) ve Şekil 14(c)'de daha net bir şekilde görülmektedir. Şekil 14(b) 12 sa.'teki sıcaklık profilini göstermekte ve Şekil 14(c) 24 sa.'lik simülasyondaki değişimi vurgulamaktadır.



Şekil 14: Düşey sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişimi. (a): t=2.89 sa. (b): t=12sa. (c): t=24 sa. Sıcak su girişi serbest yüzeye yakındır. Soğuk su çıkışı taban yakındır. Yüzeyde güneş ışımasını ile ısınma göz önüne alınmıştır. Kırmızı kalın çizgi rüzgarsız türbülans modelli durumu, kırmızı kesikli çizgi rüzgarsız türbülans modeli kullanılmamış durumu, mavi çizgi ise rüzgârlı ve türbülans modelli durumu göstermektedir.

Bir göldeki dikey sıcaklık dağılımı, mühendisler, çevre bilimciler ve jeomorfologlar için önem taşır. Bu dağılımı etkileyen ana unsurlar rüzgâr etkisi, güneş ışıması, mevsimlik ısınma/soğuma ve sisteme su giriş/çıkışlarıdır. Rüzgâr etkisi, karıştırma sürecini yönlendiren ana mekanik etkidir. Kuzey Yarıküre'deki göllerde termoklinlerin yazın oluşması oldukça mümkündür.

Bu çalışmada, Galler'de bulunan Llyn Cwellyn Gölü'nün gerçek verileri [1] termik santrallerin soğutma senaryoları dikkate alınarak suni bir göle uygulanmıştır. Sıcak suyun bir göle veya insan yapımı bir havuza bırakılması, suyun kalitesi ve canlı organizmaların yaşam alanı açısından dikey sıcaklık profilinde önemli sonuçlar doğurmaktadır. PROBE gibi bir boyutlu sonlu hacim yazılımı kullanarak sıcaklığın hızlı değişimini tahmin etmek, bu tür santrallerin soğutma sistemlerinin tasarımı ve işletmesinde önemli bir avantaj sağlayabilmektedir. PROBE'de, 24 sa.'lik periyodu simülasyonu birkaç dakika alır, bu nedenle olası bir soruna çözüm bulmaya veya çok kısa zamanda çözümü optimize edebilmeye olanak sağlamak bu tür yazılımların en büyük avantajıdır. Bu tür 1B yazılımlar olası durum senaryolarının değerlendirilmesinde ve buna benzer mühendislik uygulamalarında çabuk ve güvenilir sonuçlar vermesi açısından kullanışlıdır.

Bu çalışma ile bir boyutlu modellemede türbülansın, rüzgârın ve yüzeydeki ışımanın önemi gösterilmiştir. Gerçekçi değerlendirme yapılabilmesi için durağan su kütlelerinin termal simülasyonlarında dahi türbülansın modellenmesi çok önemlidir. Türbülansın ihmal edilmesi ile lokal değerlerde abartılı artışlar (pikler) gözlenebilmekte, gerçekçi karışım değerleri elde edilmemektedir. Türbülansın ihmal edilmesi ile simülasyonlarda kullanılan zaman aralığı (time step) önemli ölçüde artırılabilir ve zaman adımlaması hızlanmaktadır. Fakat elde edilen profillerde ısının yayılımı gerçekçi değildir. Türbülans ancak kısa süreli (örneğin 1 sa.'lik ya da daha kısa süreli) bir etkinin düşey sıcaklık dağılımına etkisi değerlendirilirken ihmal edilebilir. Uzun vadeli etkileşimlerde bilhassa rüzgâr göz önüne alındığında türbülans mutlaka değerlendirilmelidir. Aynı zamanda bu tür senaryoların saha ölçümleri ile desteklenmesi (örneğin rüzgâr ve ısınım ölçümleri) termik santrallerin çalışmasıyla eş zamanlı oluşabilecek durumları anında değerlendirmek açısından önem taşımaktadır. Rüzgârın mekanik karıştırma etkisi yadsınmaz. Bu tüm santralin işleyişine etki edebilecek, özellikle soğutma suyunun sıcaklığını değiştirebilecek bir etkidir.

## 5 Kaynaklar

- [1] Darbyshire J, Edwards A. "Seasonal formation and movement of the thermocline in lakes". *Pure and Applied Geophysics*, 93(1), 141-150, 1972.
- [2] Spigel RH, Imberger J. "The classification of mixed-layer dynamics in lakes of small to medium size". *Journal of Physical Oceanography, American Meteorological Society*, 10, 1104-1121, 1980.
- [3] Horne A, Goldman C. *Limnology*. New York, USA, McGraw-Hill Key Textbooks Series 1994.
- [4] Svensson U. "A mathematical model of the seasonal thermocline". Dept. of Water Resources Eng. Univ. of Lund, Sweden, Report No. 1002, 1978.
- [5] Imboden DM, Wüest A. "Mixing mechanism in lakes." *Environmental Physics*, Switzerland, 4, 83-138, 1995.

- [6] Socolofsky SA, Jirka GH. *Mixing in Lakes and Reservoirs*. Editors: Socolofsky SA, Jirka, GH. Special Topics in Mixing and Transport Processes in the Environment, College Station, Texas, USA, Texas A&M University, 2005.
- [7] Boehrer B, Schultze M. "Stratification of lakes". *Reviews of Geophysics*, 46, 1-27, The American Geophysical Union, 2008.
- [8] Çağlar A, Yamalı C, Baker DK, Kaftanoğlu B. "Measurement of solar radiation in Ankara, Turkey". *Journal of Thermal Science and Technology*, 33(2), 135-142, 2013.
- [9] Aksoy B. "Solar radiation over turkey and its analysis". *International Journal of Remote Sensing*, 32, 6261-6272, 2011.
- [10] Tucker WA, Green AW. "A time-dependent model of the lake-averaged, vertical temperature distribution of lakes". *Limnology and Oceanography*, 22(4), 687-699, 1977.
- [11] Kirillin G, Shatwell T. "Generalized scaling of seasonal thermal stratification in lakes". *Earth-Science Reviews*, 161, 179-190, 2016.
- [12] Kraus EB, Turner JS. "A one-dimensional model of the seasonal thermocline". *Tellus*, 19(1), 98-106, 1967.
- [13] Jones I, Sahlberg J, Persson I. *Modelling the Impact of Climate Change on the Thermal Characteristics of Lakes*. Editor: George G. The Impact of Climate Change on European Lakes, Aquatic Ecology Series, Vol. 4, Dordrecht, Netherlands, Springer, 2010.
- [14] Elliott JA, Persson I, Thackeray SJ, Blenckner T. "Phytoplankton modelling of Lake Erken, Sweden by linking the models PROBE and PROTECH". *Ecological Modelling*, 202, 421-426, 2007.
- [15] Omstedt A, Svensson U. "Modelling super cooling and ice formation in a turbulent Ekman layer". *Journal of Geophysical Research*, 89, 735-744, 1984.
- [16] Sahlberg J. "Physical modelling of the akkajaure reservoir". *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(3), 268-282, 2003.
- [17] Omstedt A, Chen Y, Wesslander K. "A comparison between the ERA40 and the SMHI gridded meteorological databases as applied to Baltic Sea modelling". *Hydrology Research*, 36, 369-380, 2005.
- [18] Owens EM. "Development and testing of one-dimensional hydrothermal models of cannonsville reservoir". *Journal of Lake and Reservoir Management*, 14, 172-185, 1998.
- [19] Hamilton DP, Schladow SG. "Prediction of Water Quality in Lakes and Reservoirs. Part 1- Model Description". *Ecological Modelling*, 96, 91-110, 1997.
- [20] MacIntyre S, Flynn KM, Jellison R, Romero JR. "Boundary mixing and nutrient fluxes in Mono Lake, California". *Limnology and Oceanography*, 44, 512-529, 1999.
- [21] Yeates PS. Deep Mixing in Stratified Lakes and Reservoirs. Thesis of Doctor of Philosophy, University of Western Australia, Australia, 2008.
- [22] Svensson, U. "The structure of the turbulent ekman layer". *Tellus*, 31, 340-350, 1979.
- [23] Quay PD, Broecker WS, Hesslein RH, Schindler DW. "Vertical diffusion rates determined by tritium tracer experiments in the thermocline and hypolimnion of two lakes". *Limnology and Oceanography*, 25, 201-218. 1980.
- [24] Romero JR, Antenucci JP, Imberger J. "One and three-dimensional biogeochemical simulations of two differing reservoirs". *Ecological Modelling*, 174, 143-160, 2004.
- [25] Perroud M, Goyette S, Martynov A, Beniston M, Anneville O. "Simulation of multiannual thermal profiles in deep Lake Geneva: A comparison of one-dimensional lake models". *Limnology and Oceanography*, 54, 1574-1594, 2009.
- [26] Gal B, Imberger J, Zohary T, Antenucci J, Anis A, Rosenberg T. "Simulating the thermal dynamics of lake kinneret". *Ecological Modelling*, 162, 69-86, 2003.
- [27] Persson I, Jones ID. "The effect of water colour on lake hydrodynamics: a modelling study". *Freshwater Biology*, 53, 2345-2355, 2008.
- [28] Kling G. "Comparative transparency, depth of mixing and stability of stratification in lakes of Cameroon, West Africa". *Limnology and Oceanography*, 33, 27-40, 1988.
- [29] Mazumder A, Taylor WD, McQueen DJ, Lean DRS. "Effects of fish and plankton on lake temperature and mixing depth". *Science*, 247, 312-315, 1990.
- [30] Mazumder A, Taylor W. "Thermal structure of lakes varying in size and water clarity". *Limnology and Oceanography*, 39, 968-976, 1994
- [31] Schindler DW, Bayley SE, Parker BR, Beaty KG, Cruikshank DR, Fee EJ, Schindler EU, Stainto MP. "The effects of climatic warming on the properties of boreal lakes and streams at the experimental lakes area, northwestern Ontario". *Limnology and Oceanography*, 41, 1004-1017. 1996.
- [32] Yan ND, Dillon PJ. "Zooplankton biomass rarely improves predictions of chlorophyll concentration in Canadian Shield lakes that vary in pH". *Aquatic Ecology*, 34, 127-136, 2000.
- [33] Hambright KD. "Can zooplanktivorous fish really affect lake thermal dynamics?". *Archiv für Hydrobiologie*, 130, 429-438, 1994.
- [34] Hocking GC, Straskraba M. "The effect of light extinction on thermal stratification in reservoirs and lakes". *International Review of Hydrobiology*, 84, 535-556, 1999.
- [35] Jones I, George G, Reynolds C. "Quantifying effects of phytoplankton on the heat budgets of two large limnetic enclosures". *Freshwater Biology*, 50, 1239-1247, 2005.
- [36] Çalışkan A, Elçi Ş. "Effects of selective withdrawal on hydrodynamics of a stratified reservoir". *Water Resource Manage*, 23, 1257-1273, 2009.
- [37] Svensson U. "PROBE Program for Boundary Layers in Environmental system description and Manual". Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Report No. 24, 1998.
- [38] Nordblom O. Numerical simulation of the atmospheric surface layer. MSc Thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 1997.
- [39] Rodi W. "Turbulence models and their application in hydraulics -a state of the art review". *International association for Hydraulic Research (IAHR)*, Delft, Hollanda, 1980.
- [40] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı. "Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği". Türkiye, 2004.